نشریهٔ مهندسی عمران فردوسی   DOI: 10.22067/civil.v32i1.62236   سال سی و دوم، شمارهٔ یک، ۱۳۹۸

تأثیر ترکیب سنگدانه‌های سنگین مگنتیت و الیاف فولادی در بهبود خواص مکانیکی بتن‌های سنگین★

مجید مهربد[۱]   محمدکاظم شربتدار[۲]

چکیده *در این مقاله خصوصیات مکانیکی بتن‌های ویژه باستفاده از سنگدانه‌های سنگین مگنتیت و الیاف فولادی با ۲٤ طرح اختلاط با درصدهای ۰، ۵۰ و ۱۰۰٪ سنگدانه‌های سنگین جایگزین سنگدانه‌های معمولی، با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۵۲ و ۰/٤ و الیاف فولادی با درصدهای ۰، ۱، ۱/۵ و ۲٪ با مجموعاً ۳۰۰ نمونهٔ آزمایشگاهی مکعبی، استوانه‌ای، تیر بررسی گردید. نتایج نشان داد که استفاده از سنگدانه‌های سنگین و الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت‌های فشاری، کششی و برشی بتن شد و بیشترین تأثیر در نمونه‌های با ۵۰٪ سنگدانهٔ سنگین و ۲٪ الیاف اتفاق افتاد.*

واژه‌های کلیدی بتن‌های ویژه، الیاف فولادی، سنگدانه‌های سنگین، مقاومت، برشی، فشاری، کششی.

Magnetic Aggreagates and Steel Fibre Combination Effect on Improving of Mechanical Characteristics of High Weight Concrete

M. Mehrbod   M. K. Sharbatdar

Abstract *In this paper, the mechanical properties of special concrete with magnetic heavy weight aggregates and steel fibres, from 24 different mixed designs with 0, 50, 100% of heavy weight aggregates replacing with regular aggregates, 0.52 and 0.4 water-cement ratios and 0, 1, 1.5 and 2% of steel fibers, totally 300 specimens including cubic, cylindrical, and beam was investigated. The results showed that the compressive, tensile and shear strenghts were improved with using special aggreagate and fibres particularly with 50% high weight aggreagate and 2% steel fibres.*

Key Words Special Concrete, Steel Fibers, Heavy Aggregates, Shear, Compressive, Tensile.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۱۱/۱۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/٦/۲٤ می‌باشد.

(۱) دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، مهندسی سازه، دانشگاه سمنان.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

Email: msharbatdar@semnan.ac.ir

مقدمه

بتن‌های ویژه، به بتن‌هایی با خصوصیات غیرمعمول یا بتن‌های تولیدشده با روش‌های غیرمعمول گفته می‌شود. باتوجه به ابداع بتن‌های جدید با افزودنی‌های مختلف و خواص فیزیکی و مکانیکی مختلفی که آنها دارند می‌توان از این خصوصیات جدید در ساخت انواع سازه‌ها با کاربردهای مختلف استفاده کرد. تاکنون مشخص شده‌است که انواع الیاف می‌توانند ظرفیت کرنش، مقاومت دربرابر ضربه، میزان جذب انرژی، مقاومت سایشی و مقاومت کششی بتن را افزایش دهند. به‌طور کلی برای کاربرد در سازه، الیاف فولادی می‌توانند نقش مکملی برای میلگرد داشته باشند. الیاف فولادی با پخش ترک‌ها مقابله می‌کنند و مقاومت بتن را دربرابر خستگی، ضربه، جمع‌شدگی و تنش‌های حرارتی افزایش می‌دهند و در همهٔ مدهای شکست، روی خواص مکانیکی بتن تأثیر مثبت می‌گذارند [٤-1]. بسیاری از محققان نشان داده‌اند درصورتی‌که از روش‌های عادی اختلاط استفاده شود، الیاف با نسبت طول به قطر بیشتر از ۱۰۰، باعث کم شدن کارایی بتن به‌مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌شوند و یا به‌طور ناهمگون در بتن توزیع می‌گردند. الیاف فولادی کوتاه درنظر گرفته‌شده به‌عنوان تقویت‌کنندهٔ بتن، قطعات کوتاه فولادی هستند که دارای نسبت ابعاد (طول به قطر) حدود ۲۰ تا ۱۰۰ و دارای مقاطع و اشکال مختلف‌اند و در بتن ساخته‌شده به‌طور تصادفی پخش می‌شوند [5]. یکی از مشکلات مهم در به‌دست آوردن مخلوط یکنواخت، تمایل الیاف به توده شدن در یک جا می‌باشد که باید از این پدیده جلوگیری شود [6]. بتن الیافی SFRC، بتنی با حجم سیمان و نسبت بزرگ‌تری از ریزدانه نسبت‌به درشت‌دانه نسبت‌به بتن معمولی است و چندین روش برای طرح اختلاط آن وجود دارد که ممکن است روش طرح اختلاط برای بتن معمولی برای بتن SFRC کارایی نداشته باشد [7] و برای کاهش مقدار سیمان، برای مقادیر سیمان بالای ۳۵٪، ممکن است از خاکستر بادی استفاده شود [8]. اضافه نمودن الیاف، صرفاً برای افزایش مقاومت کششی مستقیم ارزشمند نمی‌باشد بلکه در فشار نیز باعث افزایش زیاد رفتار بعد از ترک‌خوردگی می‌شود [9]. الیاف فولادی عموماً باعث می‌شوند که سنگدانه‌ها اثر بیشتری در مقاومت خمشی SFRC داشته باشند. افزایش مقاومت خمشی نه‌تنها نسبت‌به مقدار الیاف، بلکه نسبت‌به مقدار l/d دارای حساسیت است [7,10]. ضمن این‌که الیاف برای بهبود سختی (سطح زیر نمودار کامل بار- تغییر مکان در خمش) یا افزایش ظرفیت جذب انرژی هم به بتن اضافه می‌شوند [6]. افزایش مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون ناشی از الیاف فولادی در بتن‌های با رده‌های مختلف ۳۵، ٦٥ و۸۵ مگاپاسکال نسبتاً کم است (کمتر از ۱۰٪) [11]. در تحقیقی دیگر، سه نوع الیاف پلیمری پلی پروپیلن، فولادی و الیاف کربنی انتخاب و نمونه‌های بتنی بااستفاده از آنها ساخته شده و مقاومت‌های خمشی، کششی و فشاری نمونه‌های ساخته‌شده، اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه گردیده‌است. در این تحقیق مقاومت کششی نمونه‌های بتن الیافی تهیه‌شده با الیاف فولادی بالاتر بود و نمونه‌های بتن با الیاف کربنی نسبت‌به دو نوع بتن الیافی دیگر مقاومت فشاری بالاتری داشتند. هم‌چنین مقاومت خمشی نمونه‌های بتن با الیاف کربنی نسبت‌به دو نوع بتن الیافی دیگر پایین‌تر بود اما نتایج نرمالیزه‌شده بیانگر مقاومت خمشی بیشتر بتن با الیاف فولادی بود [12,13]. برای تولید بتن سنگین از سنگدانه‌های سنگین مانند باریت، فروفسفر، ژئوتیت، هماتیت، ایلمنیت، لیمونیت، مگنتیت و ذرات پانچی فولادی چربی‌زدایی‌شده استفاده می‌شود. به‌طور کلی انتخاب سنگدانه براساس خصوصیات فیزیکی، قابلیت دسترسی و هزینه انجام می‌شود [14]. به‌منظور دستیابی به ارزیابی ویژگی‌های بتن سنگین بااستفاده از فولاد سرباره، خصوصاً درمورد ویژگی‌های محافظت در تشعشع آن، آزمایش‌های متعددی طراحی و اجرا

گردیده‌است [15,16]. آزمایش‌هایی در دانشگاه براویجایای اندونزی مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بتن سنگین انجام شده و نتایج نشان داده‌است که بتن سنگین، تشعشع بیشتری را نسبت‌به بتن معمولی جذب می‌کند و ضریب میرایی تشعشع بتن سنگین، از ضریب میرایی تشعشع بتن معمولی بالاتر است به‌طوری‌که افزایش ضخامت نمونه‌های بتن سنگین و معمولی، ضریب میرایی مؤثر را افزایش می‌دهد [17,18]. در بررسی دیگری، برخی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن ساخته‌شده با سنگدانه‌های باریت $BaSO_4$، تحلیل شده‌است و نمونه‌هایی شامل درصدهای حجمی ۰، ۱۰، ۲۰ ،۳۰، ۴۰ و ۵۰٪ سنگدانه‌های باریت آماده شده‌است و نتایج آزمایش‌های بتن معمولی و بتن تهیه‌شده با باریت با هم مقایسه شده‌اند. نتایج نشان‌دهندهٔ افزایش ضریب هدایت گرمایی تا ۱۰۰٪ برای بتن سنگین بوده‌است [19]. در یک تحقیق برروی سنگ شکستهٔ طبیعی و هم‌چنین دانه‌های باریت در ترکیه، با افزایش میزان باریت، درصد جذب آب کاهش پیدا کرده و با دانه‌های باریت دارای وزن مخصوص بالا، ضریب الاستیسیته و وزن مخصوص و ضریب هدایت گرمایی هم افزایش یافته‌است [20]. مصالح مازاد صنعتی SBR به‌عنوان مادهٔ افزودنی به بتن به‌منظور تولید بتن سنگین با جایگزینی آن به‌جای ماسه استفاده شده، اما تأثیر زیادی بر مقاومت فشاری بتن نداشته‌است ولی افزایش درصد SBR وزن مخصوص بتن را افزایش داده‌است [14,21]. در مطالعهٔ آزمایشگاهی انجام‌شده با سنگدانه‌های مگنتیت به‌عنوان بتن محافظ دربرابر حرارت بالا تا ۸۰۰ درجه، مشخص شده‌است که مقاومت فشاری بتن مرجع شامل سنگدانه‌های معمولی، با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد ولی مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی مگنتیت تا ۳۰۰ درجه افزایش می‌یاسد و در دمای ٤٥٠°C شروع به کاهش می‌کند. با این اوصاف، مقاومت فشاری نمونه‌ها هنوز بیشتر از نمونهٔ مرجع می‌باشد [22]. در تحقیقی برروی بتن سنگین از سنگ معدن طبیعی ایلمنیت و سرپنتین به‌ترتیب به‌عنوان درشت‌دانه و ریزدانه استفاده شده‌است تا بتن ISFHWC که توانایی مقاومت دربرابر اثرات انفجار هسته‌ای را دارد بررسی گردد. نتایج نشان می‌دهد که سرعت امواج صوتی با زیاد شدن حجم الیاف تا ۲٪، افزایش می‌یابد و هرچه زمان بیشتری سپری شود مقاومت فشاری نیز افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین افزایش حجم الیاف تا حداکثر ۳٪ حجمی، به افزایش ۱۰۰٪ مقاومت خمشی منجر می‌شود. این امر ممکن است ناشی از درصد الیاف که خود باعث بزرگی سطح خمش می‌شود باشد. ضمناً مقادیر مقاومت ضربه‌ای در اولین ترک و ترک انهدام بتن ISFHWC، خیلی بیشتر از آن مقدار در بتن معمولی است؛ لذا المان‌های سازه‌ای پناهگاه بتن ISFHWC می‌توانند نزدیک به نصف ابعاد بتن معمولی طراحی شوند [23]. از آهن به‌عنوان جایگزین درشت‌دانه و ریزدانه استفاده می‌شود و بتن سنگین از همان روش طراحی بتن معمولی می‌تواند طرح شود لذا سنگدانه‌های درشت با هماتیت به‌مقدار ۰ تا ۵۰٪ جایگزین می‌شوند که نتایج کلی آزمایش‌ها نشان می‌دهد دانه‌های هماتیت می‌توانند برای ساخت بتن سنگین استفاده شوند؛ اما این امر تأثیر زیادی برروی مشخصات مقاومتی بتن نظیر مقاومت فشاری، کششی و خمشی نخواهد داشت [24]. پدیدهٔ افزایش مقاومت در بتن ساخته‌شده از نوع سنگدانهٔ گرانیتی به‌همراه میکروسیلیس را می‌توان به چسبندگی بهتر این سنگدانه‌ها با خمیر سیمان و مقاومت سنگدانه ارتباط داد به‌طوری‌که تأثیرپذیری نوع سنگدانه در روابط فشار و کشش و مدول الاستیسیته به‌خصوص برای بتن‌های با مقاومت بالای ٦٠ مگاپاسکال کاملاً مشهود است، بنابراین بتن ساخته‌شده با سنگدانه‌های گرانیتی، به‌دلیل هموژن بودن و تراکم سنگدانه‌ها، از صلبیت بالایی درمقایسه با سنگدانه‌های آهکی برخوردار است که درنتیجه مدول الاستیسیته در بتن‌های با سنگدانه‌های گرانیتی به‌طور محسوسی بیشتر از بتن‌های با

سنگدانه‌های آهکی می‌باشد [25].

نمونه‌های آزمایشگاهی

مشخصات مصالح و نمونه‌ها

اثر الیاف فولادی در بتن و نقش سنگدانه‌های سنگین مگنتیت به‌همراه نسبت آب به سیمان W/C بر خواص بتن تازه و سخت‌شده از اهداف این تحقیق آزمایشگاهی است، لذا دو مقدار برای متغیر W/C (۰/٤ و ۰/۵۲)، سه مقدار برای سنگدانه‌های سنگین مگنتیت (تمام سنگدانه‌های معمولی، ۵۰٪ سنگدانه‌های سنگین مگنتیت و۵۰٪ سنگدانه‌های معمولی و تمام سنگدانه‌ها از نوع سنگین) انتخاب شد و چهار مقدار برای الیاف فولادی (۰، ۱، ۱/۵ و ۲٪ حجم بتن) درنظر گرفته شد؛ به‌این‌ترتیب درمجموع ٢٤ طرح مختلف آزمایشگاهی مطابق جدول (۱) و تعداد کل نمونه‌ها برابر ۳۰۰ نمونهٔ استوانه‌ای، مکعبی و برشی مطابق شکل (۱) درنظر گرفته شد. نمونه‌ها شامل ١٤٤ نمونهٔ ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر استوانه‌ای برای آزمایش مقاومت فشاری و کششی برزیلی، ۱۲۰ نمونهٔ مکعبی ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر برای آزمایش مقاومت فشاری و ۳٦ نمونهٔ ۳۸×۱۵۰×٤۰۰ میلی‌متر برای آزمایش مقاومت برشی ساخته شد. نام‌گذاری طرح‌های اختلاط براساس نوع مصالح مصرفی در آن مطابق جدول (۱) است. طرح‌های اختلاط شامل سنگدانه‌های کاملاً معمولی با علامت N، ۵۰٪ سنگدانهٔ سنگین و ۵۰٪ سنگدانهٔ معمولی با علامت NW، و سنگدانه‌های کاملاً سنگین با علامت W نام‌گذاری شدند. طرح‌های اختلاط با درصد الیاف ۰ با علامت F0، درصد الیاف ۱ با علامت F1، درصد الیاف ۱/۵ با علامت F1.5 و با درصد الیاف ۲ با علامت F2 مشخص شد. علاوه‌بر آن، کلیهٔ طرح‌های اختلاط تعیین‌شده با دو نسبت مختلف آب به سیمان ۰/۵۲ و ۰/٤ برای تعیین اثر نسبت‌های آب به سیمان مختلف بر مشخصات مکانیکی نمونه ساخته شد که به‌ترتیب با علامت اختصاری ۱ و ۲ در طرح‌های اختلاط مشخص گردید. سیمان استفاده‌شده در این تحقیق، سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانهٔ سیمان شاهرود بوده‌است. در این تحقیق از دو نوع سنگدانه شامل سنگدانه‌های با چگالی بالای مگنتیت (Fe_3O_4) و سنگدانه‌های معمولی و هر یک نیز شامل ریزدانه (ماسه) و درشت‌دانه (شن) با مشخصات مطابق جدول (۲) استفاده شده‌است. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های معمولی و سنگین در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده‌است و سعی شده‌است طوری دانه‌بندی شوند که منحنی دانه‌بندی آنها به منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های معمولی نزدیک باشد. نسبت ۵۰٪ به‌صورت حجمی می‌باشد و باتوجه به چگالی و وزن مخصوص ماسه‌ها و شن‌ها، وزن آنها محاسبه شده‌است. الیاف فولادی مورد استفاده از شرکت DUROCEM ایتالیا با مشخصات جدول (۳) و شکل (٤) بوده‌است.



(الف) نمونه‌های مکعبی



(ب) نمونه‌های استوانه‌ای



(ج) نمونه‌های برشی

شکل ۱ نمونه‌های آزمایشگاهی مورد نظر

جدول ۱ نام‌گذاری و مشخصات طرح‌های اختلاط مختلف

ردیف	نشان اختصاری	مشخصات
۱	N1	سنگدانه‌های معمولی، بدون الیاف و نسبت آب به سیمان ۰,۵۲
۲	N2	سنگدانه‌های معمولی، بدون الیاف و نسبت آب به سیمان ۰,٤
۳	NW1	سنگدانه‌های معمولی و سنگین، بدون الیاف و نسبت آب به سیمان ۰,۵۲
٤	NW2	سنگدانه‌های معمولی و سنگین، بدون الیاف و نسبت آب به سیمان ۰,٤
۵	W1	سنگدانه‌های سنگین، بدون الیاف و نسبت آب به سیمان ۰,۵۲
٦	W2	سنگدانه‌های سنگین، بدون الیاف و نسبت آب به سیمان ۰,٤
۷	N1F1	سنگدانه‌های معمولی، با الیاف ۱٪ و نسبت آب به سیمان ۰,۵۲
۸	N2F1	سنگدانه‌های معمولی، با الیاف ۱٪ و نسبت آب به سیمان ۰,٤
۹	NW1F1	سنگدانه‌های معمولی و سنگین، با الیاف ۱٪ و نسبت آب به سیمان ۰,۵۲
۱۰	NW2F1	سنگدانه‌های معمولی و سنگین، با الیاف ۱٪ و نسبت آب به سیمان ۰,٤
۱۱	W1F1	سنگدانه‌های سنگین، با الیاف ۱٪ و نسبت آب به سیمان ۰,۵۲
۱۲	W2F1	سنگدانه‌های سنگین، با الیاف ۱٪ و نسبت آب به سیمان ۰,٤
۱۳	N1F1.5	سنگدانه‌های معمولی، با الیاف ۱/۵ ٪ و نسبت آب به سیمان ۰,۵۲
۱٤	N2F1.5	سنگدانه‌های معمولی، با الیاف ۱/۵ ٪ و نسبت آب به سیمان ۰,٤
۱۵	NW1F1.5	سنگدانه‌های معمولی و سنگین، با الیاف ۱/۵ ٪ و نسبت آب به سیمان ۰,۵۲
۱٦	NW2F1.5	سنگدانه‌های معمولی و سنگین، با الیاف ۱/۵ ٪ و نسبت آب به سیمان ۰,٤
۱۷	W1F1.5	سنگدانه‌های سنگین، با الیاف ۱/۵ ٪ و نسبت آب به سیمان ۰,۵۲
۱۸	W2F1.5	سنگدانه‌های سنگین، با الیاف ۱/۵ ٪ و نسبت آب به سیمان ۰,٤
۱۹	N1F2	سنگدانه‌های معمولی، با الیاف ۲٪ و نسبت آب به سیمان ۰,۵۲
۲۰	N2F2	سنگدانه‌های معمولی، با الیاف ۲٪ و نسبت آب به سیمان ۰,٤
۲۱	NW1F2	سنگدانه‌های معمولی و سنگین، با الیاف ۲٪ و نسبت آب به سیمان ۰,۵۲
۲۲	NW2F2	سنگدانه‌های معمولی و سنگین، با الیاف ۲٪ و نسبت آب به سیمان ۰,٤
۲۳	W1F2	سنگدانه‌های سنگین، با الیاف ۲٪ و نسبت آب به سیمان ۰,۵۲
۲٤	W2F2	سنگدانه‌های سنگین، با الیاف ۲٪ و نسبت آب به سیمان ۰,٤

جدول ۲ مشخصات فیزیکی مصالح سنگی

مشخصات / نوع	شکل ظاهری	وزن مخصوص (kg/m^3)	چگالی نسبی	مدول نرمی	درصد جذب	درصد رطوبت
شن سنگین	نسبتاً تیز گوشه	۲٤۰۰	٤/۱۸	–	۱,۵	۰/٤
ماسه سنگین	نسبتاً تیز گوشه	۲۷٤۰	۳/۷۷	۳	۲,۳	۰/٦۲
شن معمولی	نسبتاً تیز گوشه	۱۵۹۰	۲/٦۷	–	۱,۳	۰/۳٦
ماسهٔ معمولی	نسبتاً تیز گوشه	۱۷۷۰	۲/٤۵	۳	۲,۲	۰/۸۸

جدول ۳ مشخصات فنی و مکانیکی الیاف فولادی

مقاومت کششی (MPa)	Type	L/d	Elongation (%)	Material	L (mm)	d (mm)
۸۰۰	Hooked	۳۷/۵	۱,۳	Steel	۳۰	۰/۸

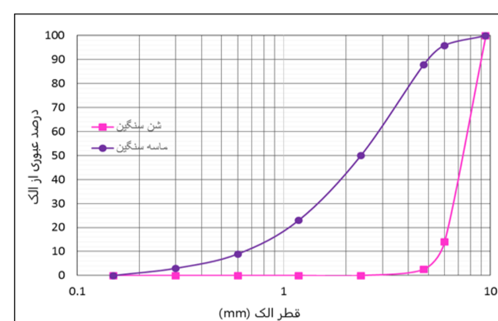
آزمایش‌های بتن تازه و سخت‌شده

آزمایش استاندارد اسلامپ (قالب به‌شکل مخروط ناقص به‌ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر، قطر ۱۰۰ میلی‌متر در بالا و قطر ۲۰۰ میلی‌متر در پایین) برای مشخص کردن درجهٔ کارایی براساس استاندارد ASTM-C143 انجام می‌گیرد. آزمایش وزن مخصوص بتن تازه هم براساس استاندارد ASTM-C138 انجام می‌گیرد. نمونه‌ها بعد از ۲٤ ساعت در آب قرار داده و تا ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. قبل از انجام آزمایش‌های بتن سخت‌شده، کلیهٔ نمونه‌ها توزین و وزن مخصوص سخت‌شدهٔ نمونه‌ها محاسبه گردید. برای تست مقاومت فشاری و کششی (برزیلی) از دستگاه Toni Technik استفاده گردید.

بارگذاری نمونه‌های فشاری طبق استاندارد BS1881 و استاندارد ASTM-C39 انجام شد. مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مکعبی و استوانه‌ای از تقسیم مقدار بار نهایی قرائت‌شده از دستگاه بر سطح بارگذاری برابر $f = \frac{P_{max}}{A}$ به‌دست آمد.



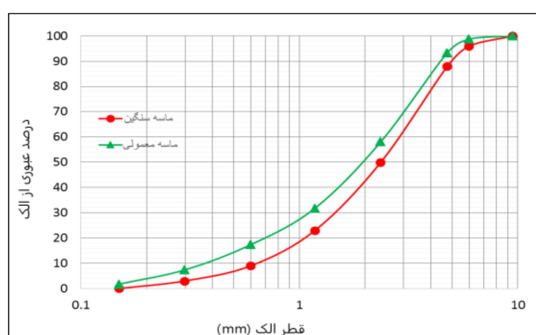
(الف) ماسه و شن معمولی



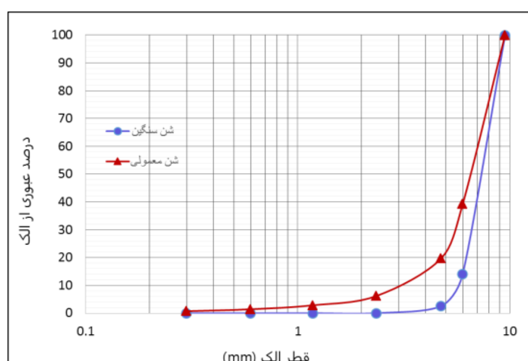
(ب) ماسه و شن سنگین مگنتیت

شکل ۲ منحنی دانه‌بندی ماسه و شن

هم‌چنین برای اندازه‌گیری مقاومت کششی از استاندارد ASTMC496 استفاده گردید که مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها از رابطهٔ $f_t = \frac{2P_{max}}{\pi . D . L}$ محاسبه شد که در آن P_{max} بار نهایی و D و L قطر و طول استوانه است.



(الف) ماسهٔ معمولی و سنگین مگنتیت



(ب) شن معمولی و سنگین مگنتیت

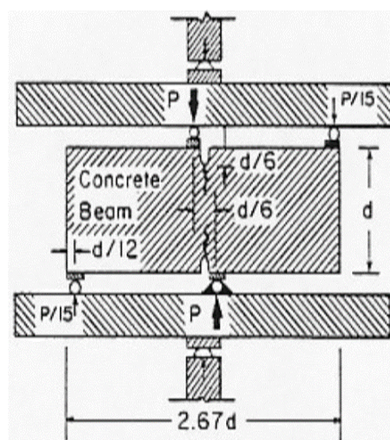
شکل ۳ مقایسهٔ منحنی دانه‌بندی سنگدانهٔ معمولی و سنگین



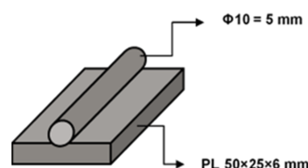
شکل ٤ الیاف فولادی مورد استفاده

برای آزمایش مقاومت برشی بتن از همان دستگاه به‌همراه استفاده از سیستم بارگذاری مطابق شکل (٥) برروی نمونه‌های تیری‌شکل به‌ابعاد ۳۸×۱۵۰×٤۰۰

میلی‌متر بهره گرفته شد. برای بارگذاری نقطه‌ای به‌صورت غلتکی مطابق شکل از آرماتور ساده و ورق فولادی استفاده شد. بار دستگاه در محل بارگذاری P بالایی نشان داده‌شده در شکل اعمال گردید و در محل بار P پایینی یکی از غلتک‌ها برروی نشیمن مهار شد تا تکیه‌گاه مفصلی تأمین شود. ملاحظه می‌شود بیشینهٔ میزان برش $\frac{14P}{15}$ در محدودهٔ $\frac{d}{6}$ وسط از طول تیر اعمال می‌شود و برای این‌که برش حتی‌الامکان از مقطعی ضعیف‌شده اتفاق بیفتد دو شیار به‌ابعاد ۲۵×۲/۵ میلی‌متر و به‌ضخامت نمونه در بالا و پایین نمونه با دستگاه برش ایجاد شد. مقاومت برشی نمونه‌ها به‌صورت متوسط از رابطهٔ $f_s = \frac{14P_{max}}{15A}$ محاسبه گردید که P_{max} بار نهایی و A سطح بارگذاری‌شده برابر ۳۸۰۰ میلی‌متر مربع است. نمونه‌های فشاری مکعبی در سنین ۷ و ۲۸روزه و نمونه‌های آزمایشی کششی برزیلی و فشاری استوانه‌ای و همین‌طور همهٔ نمونه‌های تیری برای آزمایش مقاومت برشی بتن در سن ۲۸روزه آزمایش شدند.



(الف) چیدمان آزمایش



(ب) غلتک‌های آماده‌شده



(ج) نمونهٔ واقعی حین آزمایش

شکل ۵ آزمایش مقاومت برشی

نتایج آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل

اسلامپ

مقادیر اسلامپ و درصد کاهش آن در تمامی طرح‌های اختلاط نسبت‌به طرح اختلاط بتن مرجع N1 با ثابت فرض نمودن یکی از متغیرهای نسبت آب به سیمان به‌دست می آید که در جدول (٤) نشان داده شده‌است. ملاحظه می‌شود بیشترین کاهش اسلامپ در نسبت آب به سیمان ۰/٤ به‌میزان ۵۷/۱٤٪ اتفاق می‌افتد و با ثابت فرض نمودن الیاف فولادی، ملاحظه می‌شود بیشترین کاهش اسلامپ در نمونه‌های حاوی ۲٪ الیاف فولادی به‌میزان ۵۷/۱٤٪ اتفاق می‌افتد و نتیجه می‌شود هرچه الیاف بیشتر باشد اسلامپ کاهش خواهد یافت. هم‌چنین با فرض ثابت بودن درصد استفاده از سنگدانه‌های سنگین مگنتیت نسبت‌به کل حجم سنگدانه‌ها، نتایج نشان می‌دهد که بیشترین کاهش اسلامپ مربوط به بتن حاوی ۱۰۰٪ سنگدانه‌های سنگین و به‌میزان ۵۷/۱٤٪ می‌باشد، بنابراین هرچه میزان سنگدانه‌های سنگین بیشتر شود اسلامپ کاهش خواهد یافت.

وزن مخصوص بتن سخت‌شده

مقادیر وزن مخصوص بتن سخت‌شده و درصد افزایش آن در تمامی طرح‌های اختلاط نسبت‌به طرح اختلاط بتن مرجع N1 با ثابت فرض نمودن یکی از متغیرهای نسبت آب به سیمان به‌دست می‌آید که در جدول (۵)

نشان داده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد وزن مخصوص نمونه‌ها نسبت‌به میزان W/C حساسیت زیادی ندارد اما بیشترین وزن مخصوص مربوط به بتن W1F2 و به‌میزان ٪٤٤/٨٧ نسبت‌به بتن معمولی می‌باشد. با ثابت بودن درصد سنگدانه‌ها، هرچه میزان الیاف بیشتر باشد وزن مخصوص بتن نیز افزایش خواهد یافت و بیشترین میزان افزایش وزن مخصوص مربوط به بتن حاوی ٪۲ الیاف می‌باشد و هم‌چنین با ثابت بودن درصد الیاف، بیشترین افزایش وزن مخصوص مربوط به ردهٔ بتن ٪۱۰۰ سنگدانه‌های سنگین به‌میزان ٪٤٤/٨٧ می‌باشد.

جدول ٤ تغییرات اسلامپ با ثابت بودن یکی از متغیرها در همهٔ طرح‌های اختلاط

(الف) نسبت آب به سیمان ۰/۵۲ و ۰/٤

W/C = ۰/۵۲				W/C = ۰/۴			
ردیف	نام اختصاری طرح اختلاط	اسلامپ (cm)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1	ردیف	نام اختصاری طرح اختلاط	اسلامپ (cm)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1	۹,۱	۰	۱	N2	۸,۸	-۳,۳
۲	NW1	۸,۳	-۸,۷۹	۲	NW2	۷,۶	-۱۶,۴۸
۳	W1	۷,۳	-۱۹,۷۸	۳	W2	۶,۴	-۲۹,۶۷
۴	N1F1	۸,۲	-۹,۸۹	۴	N2F1	۷,۸	-۱۴,۲۹
۵	NW1F1	۷,۱	-۲۱,۹۸	۵	NW2F1	۶,۵	-۲۸,۵۷
۶	W1F1	۶,۲	-۳۱,۸۷	۶	W2F1	۵,۱	-۴۳,۹۶
۷	N1F1.5	۷,۵	-۱۷,۵۸	۷	N2F1.5	۷,۱	-۲۱,۹۸
۸	NW1F1.5	۶,۵	-۲۸,۵۷	۸	NW2F1.5	۵,۷	-۳۷,۳۶
۹	W1F1.5	۵,۵	-۳۹,۵۶	۹	W2F1.5	۴,۵	-۵۰,۵۵
۱۰	N1F2	۶,۹	-۲۴,۱۸	۱۰	N2F2	۶,۵	-۲۸,۵۷
۱۱	NW1F2	۵,۸	-۳۶,۲۶	۱۱	NW2F2	۵,۱	-۴۳,۹۶
۱۲	W1F2	۴,۸	-۴۷,۲۵	۱۲	W2F2	۳,۹	-۵۷,۱۴

(ب) صفر و ٪۱ الیاف فولادی

بدون الیاف				الیاف ٪۱			
ردیف	نام اختصاری	اسلامپ (cm)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1	ردیف	نام اختصاری	اسلامپ (cm)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1	۹,۱	۰	۱	N1F1	۸,۲	-۹,۸۹
۲	N2	۸,۸	-۳,۳	۲	N2F1	۷,۸	-۱۴,۲۹
۳	NW1	۸,۳	-۸,۷۹	۳	NW1F1	۷,۱	-۲۱,۹۸
۴	NW2	۷,۶	-۱۶,۴۸	۴	NW2F1	۶,۵	-۲۸,۵۷
۵	W1	۷,۳	-۱۹,۷۸	۵	W1F1	۶,۲	-۳۱,۸۷
۶	W2	۶,۴	-۲۹,۶۷	۶	W2F1	۵,۱	-۴۳,۹۶

(ج) ۱/۵ و ۲٪ الیاف فولادی

الیاف ۱/۵ ٪				الیاف ۲٪			
ردیف	نام اختصاری	اسلامپ (cm)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1	ردیف	نام اختصاری	اسلامپ (cm)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1F1.5	۷,۵	-۱۷,۵۸	۱	N1F2	۶,۹	-۲۴,۱۸
۲	N2F1.5	۷,۱	-۲۱,۹۸	۲	N2F2	۶,۵	-۲۸,۵۷
۳	NW1F1.5	۶,۵	-۲۸,۵۷	۳	NW1F2	۵,۸	-۳۶,۲۶
۴	NW2F1.5	۵,۷	-۳۷,۳۶	۴	NW2F2	۵,۱	-۴۳,۹۶
۵	W1F1.5	۵,۵	-۳۹,۵۶	۵	W1F2	۴,۸	-۴۷,۲۵
۶	W2F1.5	۴,۵	-۵۰,۵۵	۶	W2F2	۳,۹	-۵۷,۱۴

(د) ۰ و ۵۰٪ سنگدانه‌های سنگین

بدون سنگدانه های سنگین				۵۰٪ سنگدانه های سنگین			
ردیف	نام اختصاری	اسلامپ (cm)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1	ردیف	نام اختصاری	اسلامپ (cm)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1	۹,۱	۰	۱	NW1	۸,۳	-۸,۷۹
۲	N2	۸,۸	-۳,۳	۲	NW2	۷,۶	-۱۶,۴۸
۳	N1F1	۸,۲	-۹,۸۹	۳	NW1F1	۷,۱	-۲۱,۹۸
۴	N2F1	۷,۸	-۱۴,۲۹	۴	NW2F1	۶,۵	-۲۸,۵۷
۵	N1F1.5	۷,۵	-۱۷,۵۸	۵	NW1F1.5	۶,۵	-۲۸,۵۷
۶	N2F1.5	۷,۱	-۲۱,۹۸	۶	NW2F1.5	۵,۷	-۳۷,۳۶
۷	N1F2	۶,۹	-۲۴,۱۸	۷	NW1F2	۵,۸	-۳۶,۲۶
۸	N2F2	۶,۵	-۲۸,۵۷	۸	NW2F2	۵,۱	-۴۳,۹۶

(ه) ۱۰۰٪ سنگدانه‌های سنگین

۱۰۰٪ سنگدانه های سنگین			
ردیف	نام اختصاری	اسلامپ (cm)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
۱	W1	۷,۳	-۱۹,۷۸
۲	W2	۶,۴	-۲۹,۶۷
۳	W1F1	۶,۲	-۳۱,۸۷
۴	W2F1	۵,۱	-۴۳,۹۶
۵	W1F1.5	۵,۵	-۳۹,۵۶
۶	W2F1.5	۴,۵	-۵۰,۵۵
۷	W1F2	۴,۸	-۴۷,۲۵
۸	W2F2	۳,۹	-۵۷,۱۴

مقاومت فشاری

مقاومت‌های فشاری به‌عنوان پارامتر مهمی از خواص بتن‌های ویژه می‌باشد لذا در این بخش، تغییرات متوسط مقاومت‌های فشاری همهٔ نمونه‌های ساخته‌شده شامل مکعبی ۷روزه، مکعبی ۲۸روزه و استوانه‌ای ۲۸روزه مربوط به تمامی طرح‌های اختلاط نسبت‌به مقاومت فشاری به‌ترتیب مکعبی ۷روزه، مکعبی ۲۸روزه و استوانه‌ای ۲۸روزه نمونهٔ مرجع (N1) برحسب درصد با فرض ثابت بودن یکی از متغیرها محاسبه گردید و در جدول (٦) نشان داده شد. تعداد نمونه‌ها برای تعیین مقاومت مکعبی ۷روزه ۲ عدد، مکعبی ۲۸روزه ۳ عدد و استوانه‌ای ۲۸روزه ۳ عدد بوده‌است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت نسبت آب به سیمان ۰/۵۲، بیشترین افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ۷ و ۲۸روزه و استوانه‌ای ۲۸روزه نسبت‌به نمونهٔ مرجع مشابه در نمونه‌های NW1F1.5، NW1F2 و NW1F2 بود که به‌ترتیب حدود ۷۸، ۷۰ و ۷۸٪ بود. این افزایش در حالت نسبت آب به سیمان ۰/٤ در نمونه‌های NW2F2، NW2F1.5 و NW2F2 به‌ترتیب حدود ۱٤۷، ۹۹ و ۱۳۱٪ بود.

جدول ۵ تغییرات وزن مخصوص بتن سخت‌شده با ثابت بودن یکی از متغیرها در همهٔ طرح‌های اختلاط

(الف) نسبت آب به سیمان ۰/۵۲ و ۰/٤

W/C = ۰/۵۲				W/C = ۰/۴			
ردیف	نام اختصاری طرح اختلاط	وزن مخصوص gr/cm^3	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1	ردیف	نام اختصاری طرح اختلاط	وزن مخصوص gr/cm^3	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1	۲,۳۴	۰	۱	N2	۲,۳۹	۲,۱۴
۲	NW1	۲,۷۹	۱۹,۲۳	۲	NW2	۲,۷۹	۱۹,۲۳
۳	W1	۳,۲۳	۳۸,۰۳	۳	W2	۳,۲۷	۳۹,۷۴
۴	N1F1	۲,۴۴	۴,۲۷	۴	N2F1	۲,۴۸	۵,۹۸
۵	NW1F1	۲,۸۱	۲۰,۰۹	۵	NW2F1	۲,۸۸	۲۳,۰۸
۶	W1F1	۳,۳۲	۴۱,۸۸	۶	W2F1	۳,۲۸	۴۰,۱۷
۷	N1F1.5	۲,۴۷	۵,۵۶	۷	N2F1.5	۲,۵۲	۷,۶۹
۸	NW1F1.5	۲,۹۶	۲۶,۵	۸	NW2F1.5	۲,۹	۲۳,۹۳
۹	W1F1.5	۳,۳۴	۴۲,۷۴	۹	W2F1.5	۳,۳۱	۴۱,۴۵
۱۰	N1F2	۲,۴۹	۶,۴۱	۱۰	N2F2	۲,۴۹	۶,۴۱
۱۱	NW1F2	۲,۹۶	۲۶,۵	۱۱	NW2F2	۲,۹۳	۲۵,۲۱
۱۲	W1F2	۳,۳۹	۴۴,۸۷	۱۲	W2F2	۳,۳۴	۴۲,۷۴

(ب) صفر و ۱٪ الیاف فولادی

بدون الیاف				الیاف ۱٪			
ردیف	نام اختصاری	وزن مخصوص gr/cm^3	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1	ردیف	نام اختصاری	وزن مخصوص gr/cm^3	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1	۲,۳۴	۰	۱	N1F1	۲,۴۴	۴,۲۷
۲	N2	۲,۳۹	۲,۱۴	۲	N2F1	۲,۴۸	۵,۹۸
۳	NW1	۲,۷۹	۱۹,۲۳	۳	NW1F1	۲,۸۱	۲۰,۰۹
۴	NW2	۲,۷۹	۱۹,۲۳	۴	NW2F1	۲,۸۸	۲۳,۰۸
۵	W1	۳,۲۳	۳۸,۰۳	۵	W1F1	۳,۳۲	۴۱,۸۸
۶	W2	۳,۲۷	۳۹,۷۴	۶	W2F1	۳,۲۸	۴۰,۱۷

(ج) ۱/۵ و ۲٪ الیاف فولادی

ردیف	نام اختصاری	وزن مخصوص gr/cm³	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1	ردیف	نام اختصاری	وزن مخصوص gr/cm³	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
الیاف ۱/۵ ٪				الیاف ۲٪			
۱	N1F1.5	۲,۴۷	۵,۵۶	۱	N1F2	۲,۴۹	۶,۴۱
۲	N2F1.5	۲,۵۲	۷,۶۹	۲	N2F2	۲,۴۹	۶,۴۱
۳	NW1F1.5	۲,۹۶	۲۶,۵	۳	NW1F2	۲,۹۶	۲۶,۵
۴	NW2F1.5	۲,۹	۲۳,۹۳	۴	NW2F2	۲,۹۳	۲۵,۲۱
۵	W1F1.5	۳,۳۴	۴۲,۷۴	۵	W1F2	۳,۳۹	۴۴,۸۷
۶	W2F1.5	۳,۳۱	۴۱,۴۵	۶	W2F2	۳,۳۴	۴۲,۷۴

(د) ۰ و ۵۰٪ سنگدانه‌های سنگین

ردیف	نام اختصاری	وزن مخصوص gr/cm³	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1	ردیف	نام اختصاری	وزن مخصوص gr/cm³	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
بدون سنگدانه های سنگین				۵۰٪ سنگدانه های سنگین			
۱	N1	۲,۳۴	۰	۱	NW1	۲,۷۹	۱۹,۲۳
۲	N2	۲,۳۹	۲,۱۴	۲	NW2	۲,۷۹	۱۹,۲۳
۳	N1F1	۲,۴۴	۴,۲۷	۳	NW1F1	۲,۸۱	۲۰,۰۹
۴	N2F1	۲,۴۸	۵,۹۸	۴	NW2F1	۲,۸۸	۲۳,۰۸
۵	N1F1.5	۲,۴۷	۵,۵۶	۵	NW1F1.5	۲,۹۶	۲۶,۵
۶	N2F1.5	۲,۵۲	۷,۶۹	۶	NW2F1.5	۲,۹	۲۳,۹۳
۷	N1F2	۲,۴۹	۶,۴۱	۷	NW1F2	۲,۹۶	۲۶,۵
۸	N2F2	۲,۴۹	۶,۴۱	۸	NW2F2	۲,۹۳	۲۵,۲۱

(ه) ۱۰۰٪ سنگدانه‌های سنگین

ردیف	نام اختصاری	وزن مخصوص gr/cm³	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
۱۰۰٪ سنگدانه های سنگین			
۱	W1	۳,۲۳	۳۸,۰۳
۲	W2	۳,۲۷	۳۹,۷۴
۳	W1F1	۳,۳۲	۴۱,۸۸
۴	W2F1	۳,۲۸	۴۰,۱۷
۵	W1F1.5	۳,۳۴	۴۲,۷۴
۶	W2F1.5	۳,۳۱	۴۱,۴۵
۷	W1F2	۳,۳۹	۴۴,۸۷
۸	W2F2	۳,۳۴	۴۲,۷۴

تغییرات مقاومت فشاری در حالت ثابت بودن درصد الیاف نشان می‌دهد بیشترین افزایش مقاومت فشاری در حالت بدون الیاف در همهٔ نمونه‌های مکعبی ۷ و ۲۸روزه و استوانه‌ای ۲۸روزه نسبت‌به نمونهٔ مرجع مشابه در نمونه‌های NW2 به‌ترتیب حدود ۹۳، ٦۱ و ٦۹٪ بود و این افزایش در حالت ۱٪ الیاف در نمونهٔ NW2F1 به‌ترتیب حدود ۱۰۹، ۸٤ و ۹۸٪ بود و در حالت ۱/۵٪ الیاف، بیشترین افزایش مقاومت‌ها در نمونهٔ NW2F1.5 اتفاق افتاد که در مکعب‌های ۷ و ۲۸روزه برابر ۱٤۰ و ۹۳ درصد و در نمونهٔ استوانه‌ای برابر ۱۳۱٪ بود و نهایتاً در حالت ۲٪ الیاف، بیشترین افزایش مقاومت‌ها در نمونهٔ NW2F2 در مکعب‌های ۷ و ۲۸روزه برابر ۱٤۸ و ۹۹٪ و در نمونهٔ استوانه‌ای برابر ۱۱۵٪ بود. هم‌چنین در حالت ثابت بودن درصد استفاده از سنگدانه‌های سنگین نسبت‌به کل حجم سنگدانه‌ها، بیشترین میزان افزایش مقاومت فشاری مربوط به ردهٔ بتن بدون سنگدانه‌های سنگین در نمونه‌های مکعبی ۷ و ۲۸روزه و استوانه‌ای ۲۸روزه نسبت‌به نمونهٔ مرجع مشابه در نمونه‌های N2F2، N2F2 و N2F1 به‌ترتیب برابر ۱۰۲ و ۷٤ و ۹۹٪ بود و این افزایش در حالت با ۵۰٪ سنگدانهٔ سنگین در نمونه‌های مکعبی ۷ و ۲۸روزه NW2F2 و استوانه‌ای ۲۸روزه NW2F1.5 به‌ترتیب حدود ۱٤۷، ۹۹ و ۱۳۱٪ بود و در حالت با ۱۰۰٪ سنگدانهٔ سنگین برای نمونه‌های مکعبی NW2F2 و استوانه‌ای NW2F1.5 به‌ترتیب حدود ۸۸، ٦٦ و ۸۸٪ بود. ضمناً نحوهٔ شکست نمونه‌های کششی استوانه‌ای ۲۸روزه که دارای بیشترین مقاومت در هر حالت هستند به‌همراه نمونهٔ مرجع در شکل (۷) نشان داده شده‌است.

جدول ٦ تغییرات مقاومت‌های فشاری بتن سخت‌شده با ثابت بودن یکی از متغیرها در همهٔ طرح‌های اختلاط

(الف) نسبت آب به سیمان ۰/۵۲

ردیف	نام اختصاری	۷ روزه مکعبی		۲۸ روزه مکعبی		۲۸ روزه استوانه ای	
		میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1	۲۱,۴۸	۰,۰۰	۳۲,۴۵	۰,۰۰	۲۵,۲۸	۰,۰۰
۲	NW1	۳۶,۴۱	۶۹,۵۱	۴۷,۰۵	۴۴,۹۹	۳۸,۹۲	۵۳,۹۶
۳	W1	۲۱,۰۵	-۲,۰۰	۳۱,۲۲	-۳,۷۹	۲۵,۶۵	۱,۴۶
۴	N1F1	۲۸,۱۲	۳۰,۹۱	۴۰,۰۱	۲۳,۳۰	۳۲,۴۲	۲۸,۲۴
۵	NW1F1	۳۶,۰۰	۶۷,۶۰	۵۰,۳۶	۵۵,۱۹	۳۹,۳۹	۵۵,۸۱
۶	W1F1	۲۳,۷۵	۱۰,۵۷	۳۱,۸۱	-۱,۹۷	۲۵,۰۰	-۱,۱۱
۷	N1F1.5	۳۰,۲۳	۴۰,۷۴	۳۹,۸۹	۲۲,۹۳	۳۴,۴۹	۳۶,۴۳
۸	NW1F1.5	۳۸,۲۷	۷۸,۱۷	۵۲,۳۸	۶۱,۴۲	۳۷,۱۹	۴۷,۱۱
۹	W1F1.5	۲۵,۵۰	۱۸,۷۲	۳۴,۰۷	۴,۹۹	۲۶,۹۵	۶,۶۱
۱۰	N1F2	۳۶,۸۲	۷۱,۴۲	۴۸,۴۱	۴۹,۱۸	۴۰,۶۱	۶۰,۶۴
۱۱	NW1F2	۳۷,۷۶	۷۵,۷۹	۵۵,۲۵	۷۰,۲۶	۴۵,۰۴	۷۸,۱۶
۱۲	W1F2	۲۹,۹۳	۳۹,۳۴	۴۲,۴۴	۳۰,۷۹	۲۸,۹۸	۱۴,۶۴

(ب) نسبت آب به سیمان ۰/٤

ردیف	نام اختصاری	۷ روزه مکعبی		۲۸ روزه مکعبی		۲۸ روزه استوانه ای	
		میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1
۱	N2	۳۱٫۸۳	۴۸٫۱۸	۴۴٫۵۹	۳۷٫۴۱	۳۶٫۷۹	۴۵٫۵۳
۲	NW2	۴۱٫۵۵	۹۳٫۴۴	۵۲٫۳۶	۶۱٫۳۶	۴۲٫۶۲	۶۸٫۵۹
۳	W2	۳۲٫۰۹	۴۹٫۳۹	۴۴٫۱۳	۳۵٫۹۹	۳۴٫۲۳	۳۵٫۴۰
۴	N2F1	۴۱٫۳۰	۹۲٫۲۷	۵۳٫۰۳	۶۳٫۴۲	۵۰٫۲۳	۹۸٫۶۹
۵	NW2F1	۴۴٫۸۸	۱۰۸٫۹۴	۵۹٫۵۹	۸۳٫۶۴	۴۹٫۹۲	۹۷٫۴۷
۶	W2F1	۳۵٫۷۴	۶۶٫۳۹	۴۶٫۵۹	۴۳٫۵۷	۴۰٫۳۱	۵۹٫۴۵
۷	N2F1.5	۴۱٫۴۹	۹۳٫۱۶	۵۳٫۸۳	۶۵٫۸۹	۴۴٫۵۲	۷۶٫۱۱
۸	NW2F1.5	۵۱٫۷۴	۱۴۰٫۸۸	۶۲٫۴۹	۹۲٫۵۷	۵۸٫۴۶	۱۳۱٫۲۵
۹	W2F1.5	۳۸٫۵۴	۷۹٫۴۲	۵۰٫۵۱	۵۵٫۶۵	۴۷٫۶۰	۸۸٫۲۹
۱۰	N2F2	۴۳٫۳۵	۱۰۱٫۸۲	۵۶٫۵۷	۷۴٫۳۳	۴۸٫۸۹	۹۳٫۳۹
۱۱	NW2F2	۵۳٫۲۰	۱۴۷٫۶۷	۶۴٫۶۳	۹۹٫۱۷	۵۴٫۵۱	۱۱۵٫۶۳
۱۲	W2F2	۴۰٫۵۵	۸۸٫۷۸	۵۳٫۸۵	۶۵٫۹۵	۴۴٫۴۷	۷۵٫۹۱

(ج) بدون الیاف فولادی

ردیف	نام اختصاری	۷ روزه مکعبی		۲۸ روزه مکعبی		۲۸ روزه استوانه ای	
		میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1	۲۱٫۴۸	۰٫۰۰	۳۲٫۴۵	۰٫۰۰	۲۵٫۲۸	۰٫۰۰
۲	N2	۳۱٫۸۳	۴۸٫۱۸	۴۴٫۵۹	۳۷٫۴۱	۳۶٫۷۹	۴۵٫۵۳
۳	NW1	۳۶٫۴۱	۶۹٫۵۱	۴۷٫۰۵	۴۴٫۹۹	۳۸٫۹۲	۵۳٫۹۶
۴	NW2	۴۱٫۵۵	۹۳٫۴۴	۵۲٫۳۶	۶۱٫۳۶	۴۲٫۶۲	۶۸٫۵۹
۵	W1	۲۱٫۰۵	-۲٫۰۰	۳۱٫۲۲	-۳٫۷۹	۲۵٫۶۵	۱٫۴۶
۶	W2	۳۲٫۰۹	۴۹٫۳۹	۴۴٫۱۳	۳۵٫۹۹	۳۴٫۲۳	۳۵٫۴۰

(د) ۱٪ الیاف فولادی

ردیف	نام اختصاری	۷ روزه مکعبی		۲۸ روزه مکعبی		۲۸ روزه استوانه ای	
		میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1F1	۲۸٫۱۲	۳۰٫۹۱	۴۰٫۰۱	۲۳٫۳۰	۳۲٫۴۲	۲۸٫۲۴
۲	N2F1	۴۱٫۳۰	۹۲٫۲۷	۵۳٫۰۳	۶۳٫۴۲	۵۰٫۲۳	۹۸٫۶۹
۳	NW1F1	۳۶٫۰۰	۶۷٫۶	۵۰٫۳۶	۵۵٫۱۹	۳۹٫۳۹	۵۵٫۸۱
۴	NW2F1	۴۴٫۸۸	۱۰۸٫۹۴	۵۹٫۵۹	۸۳٫۶۴	۴۹٫۹۲	۹۷٫۴۷
۵	W1F1	۲۳٫۷۵	۱۰٫۵۷	۳۱٫۸۱	-۱٫۹۷	۲۵٫۰۰	-۱٫۱۱
۶	W2F1	۳۵٫۷۴	۶۶٫۳۹	۴۶٫۵۹	۴۳٫۵۷	۴۰٫۳۱	۵۹٫۴۵

(ه) ۱/۵٪ الیاف فولادی

ردیف	نام اختصاری	۷ روزه مکعبی		۲۸ روزه مکعبی		۲۸ روزه استوانه ای	
		میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1F1.5	۳۰,۲۳	۴۰,۷۴	۳۹,۸۹	۲۲,۹۳	۳۴,۴۹	۳۶,۴۳
۲	N2F1.5	۴۱,۴۹	۹۳,۱۶	۵۳,۸۳	۶۵,۸۹	۴۴,۵۲	۷۶,۱۱
۳	NW1F1.5	۳۸,۲۷	۷۸,۱۷	۵۲,۳۸	۶۱,۴۲	۳۷,۱۹	۴۷,۱۱
۴	NW2F1.5	۵۱,۷۴	۱۴۰,۸۸	۶۲,۴۹	۹۲,۵۷	۵۸,۴۶	۱۳۱,۲۵
۵	W1F1.5	۲۵,۵۰	۱۸,۷۲	۳۴,۰۷	۴,۹۹	۲۶,۹۵	۶,۶۱
۶	W2F1.5	۳۸,۵۴	۷۹,۴۲	۵۰,۵۱	۵۵,۶۵	۴۷,۶۰	۸۸,۲۹

(و) ۲٪ الیاف فولادی

ردیف	نام اختصاری	۷ روزه مکعبی		۲۸ روزه مکعبی		۲۸ روزه استوانه ای	
		میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1F2	۳۶,۸۲	۷۱,۴۲	۴۸,۴۱	۴۹,۱۸	۴۰,۶۱	۶۰,۶۴
۲	N2F2	۴۳,۳۵	۱۰۱,۸۲	۵۶,۵۷	۷۴,۳۳	۴۸,۸۹	۹۳,۳۹
۳	NW1F2	۳۷,۷۶	۷۵,۷۹	۵۵,۲۵	۷۰,۲۶	۴۵,۰۴	۷۸,۱۶
۴	NW2F2	۵۳,۲۰	۱۴۷,۶۷	۶۴,۶۳	۹۹,۱۷	۵۴,۵۱	۱۱۵,۶۳
۵	W1F2	۲۹,۹۳	۳۹,۳۴	۴۲,۴۴	۳۰,۷۹	۲۸,۹۸	۱۴,۶۴
۶	W2F2	۴۰,۵۵	۸۸,۷۸	۵۳,۸۵	۶۵,۹۵	۴۴,۴۷	۷۵,۹۱

(ز) بدون سنگدانه‌های سنگین

ردیف	نام اختصاری	۷ روزه مکعبی		۲۸ روزه مکعبی		۲۸ روزه استوانه ای	
		میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1	۲۱,۴۸	۰,۰۰	۳۲,۴۵	۰,۰۰	۲۵,۲۸	۰,۰۰
۲	N2	۳۱,۸۳	۴۸,۱۸	۴۴,۵۹	۳۷,۴۱	۳۶,۷۹	۴۵,۵۳
۳	N1F1	۲۸,۱۲	۳۰,۹۱	۴۰,۰۱	۲۳,۳۰	۳۲,۴۲	۲۸,۲۴
۴	N2F1	۴۱,۳۰	۹۲,۲۷	۵۳,۰۳	۶۳,۴۲	۵۰,۲۳	۹۸,۶۹
۵	N1F1.5	۳۰,۲۳	۴۰,۷۴	۳۹,۸۹	۲۲,۹۳	۳۴,۴۹	۳۶,۴۳
۶	N2F1.5	۴۱,۴۹	۹۳,۱۶	۵۳,۸۳	۶۵,۸۹	۴۴,۵۲	۷۶,۱۱
۷	N1F2	۳۶,۸۲	۷۱,۴۲	۴۸,۴۱	۴۹,۱۸	۴۰,۶۱	۶۰,۶۴
۸	N2F2	۴۳,۳۵	۱۰۱,۸۲	۵۶,۵۷	۷۴,۳۳	۴۸,۸۹	۹۳,۳۹

(ح) ۵۰٪ سنگدانه‌های سنگین

ردیف	نام اختصاری	۷ روزه مکعبی		۲۸ روزه مکعبی		۲۸ روزه استوانه ای	
		میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1
۱	NW1	۳۶,۴۱	۶۹,۵۱	۴۷,۰۵	۴۴,۹۹	۳۸,۹۲	۵۳,۹۶
۲	NW2	۴۱,۵۵	۹۳,۴۴	۵۲,۳۶	۶۱,۳۶	۴۲,۶۲	۶۸,۵۹
۳	NW1F1	۳۶,۰۰	۶۷,۶۰	۵۰,۳۶	۵۵,۱۹	۳۹,۳۹	۵۵,۸۱
۴	NW2F1	۴۴,۸۸	۱۰۸,۹۴	۵۹,۵۹	۸۳,۶۴	۴۹,۹۲	۹۷,۴۷
۵	NW1F1.5	۳۸,۲۷	۷۸,۱۷	۵۲,۳۸	۶۱,۴۲	۳۷,۱۹	۴۷,۱۱
۶	NW2F1.5	۵۱,۷۴	۱۴۰,۸۸	۶۲,۴۹	۹۲,۵۷	۵۸,۴۶	۱۳۱,۲۵
۷	NW1F2	۳۷,۷۶	۷۵,۷۹	۵۵,۲۵	۷۰,۲۶	۴۵,۰۴	۷۸,۱۶
۸	NW2F2	۵۳,۲۰	۱۴۷,۶۷	۶۴,۶۳	۹۹,۱۷	۵۴,۵۱	۱۱۵,۶۳

(ط) ۱۰۰٪ سنگدانه‌های سنگین

ردیف	نام اختصاری	۷ روزه مکعبی		۲۸ روزه مکعبی		۲۸ روزه استوانه ای	
		میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف مقاومت میانگین نسبت به بتن مرجع N1
۱	W1	۲۱,۰۵	-۲,۰۰	۳۱,۲۲	-۳,۷۹	۲۵,۶۵	۱,۴۶
۲	W2	۳۲,۰۹	۴۹,۳۹	۴۴,۱۳	۳۵,۹۹	۳۴,۲۳	۳۵,۴
۳	W1F1	۲۳,۷۵	۱۰,۵۷	۳۱,۸۱	-۱,۹۷	۲۵,۰۰	-۱,۱۱
۴	W2F1	۳۵,۷۴	۶۶,۳۹	۴۶,۵۹	۴۳,۵۷	۴۰,۳۱	۵۹,۴۵
۵	W1F1.5	۲۵,۵۰	۱۸,۷۲	۳۴,۰۷	۴,۹۹	۲۶,۹۵	۶,۶۱
۶	W2F1.5	۳۸,۵۴	۷۹,۴۲	۵۰,۵۱	۵۵,۶۵	۴۷,۶۰	۸۸,۲۹
۷	W1F2	۲۹,۹۳	۳۹,۳۴	۴۲,۴۴	۳۰,۷۹	۲۸,۹۸	۱۴,۶۴
۸	W2F2	۴۰,۵۵	۸۸,۷۸	۵۳,۸۵	۶۵,۹۵	۴۴,۴۷	۷۵,۹۱

مقاومت کششی برزیلی

مقاومت‌های کششی و نحوهٔ شکست به‌عنوان پارامتر مهمی از خواص بتن‌های ویژه می‌باشد، لذا در این بخش، تغییرات متوسط مقاومت‌های کششی نمونه‌های استوانه‌ای ۲۸روزه مربوط به تمامی طرح‌های اختلاط نسبت‌به مقاومت کششی نمونهٔ مرجع برحسب درصد با فرض ثابت بودن یکی از متغیرها محاسبه گردید. در جدول (۷) نشان داده شده‌است که تعداد نمونه‌ها جهت تعیین این مقاومت ۳ عدد استوانه بود.

نتایج نشان می‌دهد که در حالت نسبت آب به سیمان ۰/۵۲ و ۰/٤ ، بیشترین افزایش مقاومت کششی در نمونه‌های NW1F2 و NW2F2 به‌ترتیب حدود ۱۹۸ و ۲۲۳٪ بود و این افزایش در حالت نسبت آب به سیمان ۰/٤ نسبت‌به حالت ۰/۵۲ برابر ۱۳٪ بود. بیشترین تغییرات مقاومت کششی در حالت‌های صفر، ۱ و ۱/۵ و ۲٪ الیاف در نمونه‌های NW2 ، NW2F1، NW2F1.5 و NW2F2 با افزایش ٦٥، ۱۲۰، ۱۸۱ و ۲۲۳٪ اتفاق افتاد.

مقاومت برشی

مقاومت برشی ارتباط مناسبی با پارامترهای مختلف و ترکیبات بتن دارد که در این بخش، تغییرات متوسط

مقاومت برشی نمونه‌های تیر شیاردار در همهٔ طرح‌های اختلاط نسبت‌به مقاومت برشی نمونهٔ مرجع برحسب درصد با فرض ثابت بودن یکی از متغیرها محاسبه گردیده و در جدول (۸) نشان داده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت نسبت آب به سیمان ۰/۵۲، بیشترین افزایش مقاومت برشی در نمونهٔ NW1F1.5 به‌میزان ۸۰٪ بود و بیشترین تغییرات این مقاومت در حالت‌های صفر، ۱ و ۱/۵ و ۲٪ در نمونه‌های NW1، NW1F1، NW1F1.5 و NW1F2 با افزایش ۱۸، ۳۸، ۸۰ و ۷۰٪ بود و این افزایش با صفر، ۵۰ و ۱۰۰٪ سنگدانه‌های سنگین، برابر ۵۲، ۸۰، ۵۸٪ در نمونه‌های N1F1.5، NW1F1.5، W1F1.5 بود. ضمناً نحوهٔ شکست نمونه‌های برشی ۲۸روزه که دارای بیشترین مقاومت در هر حالت هستند به‌همراه نمونهٔ مرجع در شکل (۸) نشان داده شده‌است.


(الف) N1


(ب) NW2F1.5


(ج) NW2


(د) NW2F1


(ه) NW2F2


(و) N2F1

شکل ٦ شکست نمونه‌های فشاری استوانه‌ای ۲۸روزه


(الف) N1


(ب) NW2F2


(ج) W2F2

شکل ۷ شکست نمونه‌های کششی استوانه‌ای ۲۸روزه

جدول ۷ تغییرات مقاومت‌های کششی بتن سخت‌شده با ثابت بودن یکی از متغیرها در همهٔ طرح‌های اختلاط

(الف) نسبت آب به سیمان ۰/۵۲ و ۰/٤

W/C = ۰/۵۲				W/C = ۰/۴			
ردیف	نام اختصاری طرح اختلاط	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1	ردیف	نام اختصاری طرح اختلاط	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1	۲٫۴۹	۰	۱	N2	۳٫۳۶	۳۴٫۹۴
۲	NW1	۳٫۵۴	۴۲٫۱۷	۲	NW2	۴٫۱۱	۶۵٫۰۶
۳	W1	۲٫۷	۸٫۴۳	۳	W2	۳٫۴۸	۳۹٫۷۶
۴	N1F1	۳٫۹۵	۵۸٫۶۳	۴	N2F1	۴٫۴۸	۷۹٫۹۲
۵	NW1F1	۴٫۰۲	۶۱٫۴۵	۵	NW2F1	۵٫۴۶	۱۱۹٫۲۸
۶	W1F1	۳٫۶۰	۴۴٫۵۸	۶	W2F1	۵٫۳۲	۱۱۳٫۶۵
۷	N1F1.5	۵٫۲۰	۱۰۸٫۸۴	۷	N2F1.5	۶٫۰۹	۱۴۴٫۵۸
۸	NW1F1.5	۵٫۷۸	۱۳۲٫۱۳	۸	NW2F1.5	۷٫۰۰	۱۸۱٫۱۲
۹	W1F1.5	۴٫۵۰	۸۰٫۷۲	۹	W2F1.5	۶٫۰۳	۱۴۲٫۱۷
۱۰	N1F2	۶٫۳۰	۱۵۳٫۰۱	۱۰	N2F2	۶٫۳۷	۱۵۵٫۸۲
۱۱	NW1F2	۷٫۴۱	۱۹۷٫۵۹	۱۱	NW2F2	۸٫۰۵	۲۲۳٫۲۹
۱۲	W1F2	۶٫۰۰	۱۴۰٫۹۶	۱۲	W2F2	۷٫۹۸	۲۲۰٫۴۸

(ب) صفر و ۱٪ الیاف فولادی

بدون الیاف				الیاف ۱٪			
ردیف	نام اختصاری	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1	ردیف	نام اختصاری	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1	۲٫۴۹	۰	۱	N1F1	۳٫۹۵	۵۸٫۶۳
۲	N2	۳٫۳۶	۳۴٫۹۴	۲	N2F1	۴٫۴۸	۷۹٫۹۲
۳	NW1	۳٫۵۴	۴۲٫۱۷	۳	NW1F1	۴٫۰۲	۶۱٫۴۵
۴	NW2	۴٫۱۱	۶۵٫۰۶	۴	NW2F1	۵٫۴۶	۱۱۹٫۲۸
۵	W1	۲٫۷	۸٫۴۳	۵	W1F1	۳٫۶	۴۴٫۵۸
۶	W2	۳٫۴۸	۳۹٫۷۶	۶	W2F1	۵٫۳۲	۱۱۳٫۶۵

(ج) ۱/۵ و ۲٪ الیاف فولادی

الیاف ۱/۵ ٪				الیاف ۲٪			
ردیف	نام اختصاری	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1	ردیف	نام اختصاری	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1F1.5	۵٫۲	۱۰۸٫۸۴	۱	N1F2	۶٫۳	۱۵۳٫۰۱
۲	N2F1.5	۶٫۰۹	۱۴۴٫۵۸	۲	N2F2	۶٫۳۷	۱۵۵٫۸۲
۳	NW1F1.5	۵٫۷۸	۱۳۲٫۱۳	۳	NW1F2	۷٫۴۱	۱۹۷٫۵۹
۴	NW2F1.5	۷	۱۸۱٫۱۲	۴	NW2F2	۸٫۰۵	۲۲۳٫۲۹
۵	W1F1.5	۴٫۵	۸۰٫۷۲	۵	W1F2	۶	۱۴۰٫۹۶
۶	W2F1.5	۶٫۰۳	۱۴۲٫۱۷	۶	W2F2	۷٫۹۸	۲۲۰٫۴۸

(د) ۰ و ۵۰٪ سنگدانه‌های سنگین

بدون سنگدانه های سنگین				۵۰٪ سنگدانه های سنگین			
ردیف	نام اختصاری	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1	ردیف	نام اختصاری	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1	۲,۴۹	۰	۱	NW1	۳,۵۴	۴۲,۱۷
۲	N2	۳,۳۶	۳۴,۹۴	۲	NW2	۴,۱۱	۶۵,۰۶
۳	N1F1	۳,۹۵	۵۸,۶۳	۳	NW1F1	۴,۰۲	۶۱,۴۵
۴	N2F1	۴,۴۸	۷۹,۹۲	۴	NW2F1	۵,۴۶	۱۱۹,۲۸
۵	N1F1.5	۵,۲	۱۰۸,۸۴	۵	NW1F1.5	۵,۷۸	۱۳۲,۱۳
۶	N2F1.5	۶,۰۹	۱۴۴,۵۸	۶	NW2F1.5	۷	۱۸۱,۱۲
۷	N1F2	۶,۳	۱۵۳,۰۱	۷	NW1F2	۷,۴۱	۱۹۷,۵۹
۸	N2F2	۶,۳۷	۱۵۵,۸۲	۸	NW2F2	۸,۰۵	۲۲۳,۲۹

(ه) ۱۰۰٪ سنگدانه‌های سنگین

۱۰۰٪ سنگدانه های سنگین			
ردیف	نام اختصاری	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
۱	W1	۲,۷	۸,۴۳
۲	W2	۳,۴۸	۳۹,۷۶
۳	W1F1	۳,۶	۴۴,۵۸
۴	W2F1	۵,۳۲	۱۱۳,۶۵
۵	W1F1.5	۴,۵	۸۰,۷۲
۶	W2F1.5	۶,۰۳	۱۴۲,۱۷
۷	W1F2	۶	۱۴۰,۹۶
۸	W2F2	۷,۹۸	۲۲۰,۴۸

جدول ۸ تغییرات مقاومت‌های برشی بتن سخت‌شده با ثابت بودن یکی از متغیرها در همهٔ طرح‌های اختلاط

(الف) نسبت آب به سیمان ۰/۵۲

ردیف	نام اختصاری طرح اختلاط	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1	ردیف	نام اختصاری طرح اختلاط	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1	۳,۸۶	۰,۰۰	۱	N1F1.5	۵,۸۸	۵۲,۳۳
۲	NW1	۴,۵۷	۱۸,۳۹	۲	NW1F1.5	۶,۹۴	۷۹,۷۹
۳	W1	۴,۱۲	۶,۷۴	۳	W1F1.5	۶,۱۰	۵۸,۰۳
۴	N1F1	۴,۶۱	۱۹,۴۳	۴	N1F2	۵,۴۱	۴۰,۱۶
۵	NW1F1	۵,۳۱	۳۷,۵۶	۵	NW1F2	۶,۵۷	۷۰,۲۱
۶	W1F1	۴,۹۱	۲۷,۲۰	۶	W1F2	۵,۸۱	۵۰,۵۲

(ب) صفر و ۱٪ الیاف فولادی

بدون الیاف				الیاف ۱٪			
ردیف	نام اختصاری	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1	ردیف	نام اختصاری	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1	۳,۸۶	۰,۰۰	۱	N1F1	۴,۶۱	۱۹,۴۳
۲	NW1	۴,۵۷	۱۸,۳۹	۲	NW1F1	۵,۳۱	۳۷,۵۶
۳	W1	۴,۱۲	۶,۷۴	۳	W1F1	۴,۹۱	۲۷,۲۰

(ج) ۱/۵ و ۲٪ الیاف فولادی

الیاف ۱/۵ ٪				الیاف ۲٪			
ردیف	نام اختصاری	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1	ردیف	نام اختصاری	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1F1.5	۵,۸۸	۵۲,۳۳	۱	N1F2	۵,۴۱	۴۰,۱۶
۲	NW1F1.5	۶,۹۴	۷۹,۷۹	۲	NW1F2	۶,۵۷	۷۰,۲۱
۳	W1F1.5	۶,۱۰	۵۸,۰۳	۳	W1F2	۵,۸۱	۵۰,۵۲

(د) ۰ و ۵۰٪ سنگدانه‌های سنگین

بدون سنگدانه های سنگین				۵۰٪ سنگدانه های سنگین			
ردیف	نام اختصاری	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1	ردیف	نام اختصاری	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
۱	N1	۳,۸۶	۰	۱	NW1	۴,۵۷	۱۸,۳۹
۲	N1F1	۴,۶۱	۱۹,۴۳	۲	NW1F1	۵,۳۱	۳۷,۵۶
۳	N1F1.5	۵,۸۸	۵۲,۳۳	۳	NW1F1.5	۶,۹۴	۷۹,۷۹
۴	N1F2	۵,۴۱	۴۰,۱۶	۴	NW1F2	۶,۵۷	۷۰,۲۱

(ه) ۱۰۰٪ سنگدانه‌های سنگین

۱۰۰٪ سنگدانه های سنگین			
ردیف	نام اختصاری	میانگین مقاومت (MPa)	درصد اختلاف نسبت به بتن مرجع N1
۱	W1	۴,۱۲	۶,۷۴
۲	W1F1	۴,۹۱	۲۷,۲
۳	W1F1.5	۶,۱	۵۸,۰۳
۴	W1F2	۵,۸۱	۵۰,۵۲



(الف) N1



(ب) N1F1.5



(ج) NW1F1.5



(د) W1F1.5

شکل ۸ شکست نمونه‌های برشی ۲۸روزه

بررسی پارامترهای مؤثر بر خواص مکانیکی بتن اسلامپ

میزان اسلامپ با افزایش درصد الیاف در طرح‌های اختلاط مختلف کاهش می‌یابد. از سویی دیگر درصد کاهش اسلامپ بتن با افزایش درصد استفاده از الیاف در بتن‌های با ۱۰۰٪ سنگدانه‌های سنگین بیشتر است به‌صورتی‌که حداکثر کاهش اسلامپ مربوط به بتن‌های با سنگدانه‌های سنگین حاوی ۲٪ الیاف به‌ترتیب برابر ۳٤/۲۵ و ۳۹/۰٦٪ نسبت‌به بتن بدون الیاف همان رده است. حداکثر کاهش اسلامپ بتن برای بتن‌های با سنگدانه‌های معمولی و ۲٪ الیاف به‌ترتیب برابر ۲٤/۱۸ و ۲٦/۱٤٪ است. به‌طور متوسط با افزایش هر ۰/۵٪ الیاف حدود ۱۰٪ از اسلامپ کاهش و در بتن با سنگدانه‌های معمولی به‌ازای افزایش هر ۰/۵٪ الیاف حدود ٦٪ از اسلامپ کاهش می‌یابد. میزان اسلامپ با کاهش نسبت آب به سیمان در طرح‌های اختلاط مختلف کاهش می‌یابد و این کاهش با افزایش درصد استفاده از الیاف بیشتر می‌شود. کمترین درصد کاهش اسلامپ درنتیجه کاهش نسبت آب به سیمان مربوط به بتن با سنگدانه‌های معمولی با ۳/۳٪ و بیشترین کاهش مربوط به بتن حاوی سنگدانه‌های سنگین به‌مقدار ۱۸/۷۵٪ بوده‌است. باتوجه به این‌که نسبت آب به سیمان ۰/٤ حدود ۳۰٪ از نسبت آب به سیمان ۰/۵۲ کمتر است اما حداکثر کاهش اسلامپ ناشی از این دو نسبت مختلف ۱۸/۷۵٪ می‌باشد. برای تمامی طرح‌های اختلاط با افزایش میزان استفاده از سنگدانه‌های سنگین اسلامپ آن کاهش می‌یابد و این کاهش تقریباً نسبت با مقدار سنگدانه‌های سنگین خطی است به‌طوری‌که با دو برابر کردن مقدار سنگدانه‌های سنگین میزان کاهش اسلامپ نیز دو برابر خواهد شد. حداکثر کاهش اسلامپ مربوط به بتن حاوی سنگدانه‌های سنگین و با ۲٪ الیاف به‌مقدار ٤۰٪ می‌باشد. از بخش‌های بالا نتیجه می‌شود الیاف ۲٪ و سنگدانه‌های کاملاً سنگین اثر مشابه در کاهش اسلامپ دارند.

وزن مخصوص

میزان وزن مخصوص با افزایش درصد الیاف در طرح‌های اختلاط مختلف افزایش می‌یابد. کمترین

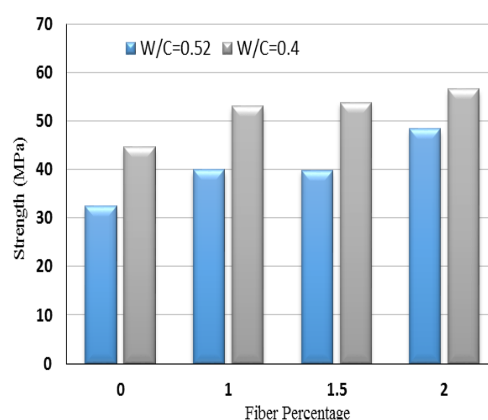
درصد تأثیر الیاف بـر وزن مخصـوص بـتن مربـوط بـه همان رده متعلق به بتن با سنگدانه‌های سنگین با نسـبت آب به سیمان ۰/٤ و معادل ۲/۱٤٪ و کمترین تأثیر الیاف بر وزن مخصوص بتن مربوط به بـتن بـا سـنگدانه‌هـای معمـولی و نسـبت آب بـه سـیمان ۰/۵۲ معـادل ٦/٤١٪ می‌باشد که حدود ۳ برابر بیشتر است. دو نسبت آب بـه سـیمان ۰/۵۲ و ۰/٤ تـأثیر زیـادی در وزن مخصـوص خشک‌شدهٔ بتن ندارد. درصد تغییـرات وزن مخصـوص بتن با نسبت آب به سیمان ۰/٤ در طـرح‌هـای اخـتلاط مختلف نسبت‌به مقدار آن در نسبت آب به سیمان ۰/۵۲ گاه قدری افزایش و گاهی نیز کاهش را نشان مـی‌دهـد. حداکثر درصد افـزایش‌یافتـه معـادل ۲/٤۹٪ و حـداکثر درصد کاهش‌یافته معادل ۲/۰۳٪ بوده‌است. برای تمـامی طـرح‌هـای اخـتلاط بـا افـزایش میـزان اسـتفاده از سنگدانه‌های سنگین، وزن مخصوص افزایش می‌یابـد و با دو برابر کردن میزان استفاده از سنگدانه‌هـای سـنگین به‌طوری‌که تمـامی سـنگدانه‌هـا از نـوع سـنگین باشـد، درصد افزایش وزن مخصـوص تقریباً دو برابـر حـالتی است که نصف سنگدانه‌ها سنگین باشـد. میـزان درصـد افزایش وزن مخصوص با درصد سنگدانه‌هـای سـنگین رابطـهٔ خطـی دارد و حـداکثر افـزایش وزن مخصـوص مربوط به بتن بدون الیاف و نسبت آب به سـیمان ۰/۵۲ و معـادل ۳۸/۰۳٪ و حـداقل افـزایش وزن مخصـوص مربوط به بتن با ۱/۵٪ الیاف و نسبت آب به سیمان ۰/٤ معـادل ۳۱/۳۵٪ بـتن معمـولی همـان رده اسـت و از پارامترهای متغیر در بتن، سنگدانه‌های سنگین بیشـترین اثر را در افـزایش وزن مخصـوص بـتن از خـود نشـان می‌دهد به‌طوری که تا حدود ۳۸٪ باعـث افـزایش وزن مخصوص بتن می‌شود.

مقاومت فشاری

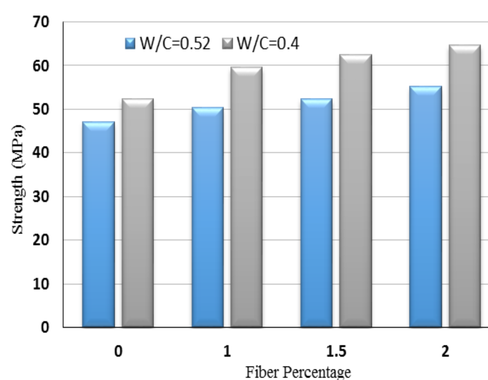
با افزایش درصد الیاف در طرح‌هـای اخـتلاط مختلـف، مقاومت فشاری ۷روزهٔ بتن برای تمام طرح‌های اختلاط افزایش می‌یابد که بیشترین مقدار آن در میزان الیاف ۲٪ است و حداکثر افزایش مقاومت بتن برای بتن‌هـای N1 و N2 به‌ترتیب برابـر ۷۱/٤۲ و ۳٦/۱۹٪ نسـبت‌بـه بـتن بدون الیاف همان رده است و افزایش مقاومت بتن برای بتن‌های NW1 و NW2 که کمترین مقدار است به‌ترتیب برابر ۵/۱۱ و ۲۸/۰٤٪ است. بتن‌های W1 و W2 از نظر میـزان افـزایش مقاومـت بـه‌ترتیـب ٤۲/۱۹ و ۲٦/۳٦٪ نسبت‌به بتن بدون الیاف همان رده افـزایش مقاومـت را نشان می‌دهند. با افـزایش درصـد الیـاف در طـرح‌هـای اختلاط مختلف مقاومت فشاری ۲۸روزهٔ مکعبی بتن نیز برای تمام طرح‌های اختلاط افزایش می‌یابد که بیشترین مقدار آن در میزان الیاف ۲٪ است کـه حـداکثر افـزایش مقاومت بتن برای بتن‌هـای N1 و N2 بـه‌ترتیـب برابـر ٤۹/۱۸ و ۲٦/۸۷٪ نسبت‌به بتن بـدون الیـاف همـان رده است. با افزایش درصـد الیـاف در طـرح‌هـای اخـتلاط مختلف در نمونه‌های استوانه‌ای نیز برآیند کلی، افزایش مقاومت فشاری ۲۸روزهٔ بتن تقریباً برای تمام طرح‌هـای اختلاط می‌باشد که حداکثر افزایش مقاومت بـتن بـرای بتن‌هـای N1 و N2 بـه‌ترتیـب برابـر ٦۰/٦٤ و ۳۲/۸۹٪ نسبت‌بـه بـتن بـدون الیـاف همـان رده اسـت. حـداکثر افزایش مقاومـت بـتن بـرای بـتن‌هـای NW1 و NW2 به‌ترتیب برابر ۱۵/۷۲ و ۲۷/۹٪ است. این در حالی است که این مقادیر برای بتن‌های W1 و W2 به‌ترتیب ۱۲/۹۸ و ۲۹/۹۲٪ نسبت‌به بتن بدون الیاف همان رده می‌باشد.

مقاومت کششی برزیلی

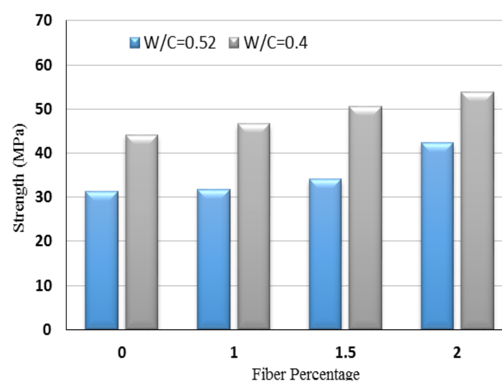
درصد تغییرات مقاومت کششی برزیلی براساس درصـد استفاده از الیاف در نمودارهـای سـتونی در شـکل (۱۰) نشان داده شده‌است. داده‌های شکل (۱۰) نشان می‌دهـد که میزان مقاومت کششی برزیلی بتن با افـزایش درصـد الیـاف در طـرح‌هـای اخـتلاط مختلـف افـزایش قابـل ملاحظه‌ای نشان می‌دهد به‌طوری‌کـه اسـتفاده از الیـاف به‌میزان ۲٪ باعث بهبود مقاومت کششی بتن تا ۲/۵ برابر بتن بدون الیاف با سنگدانه‌های معمولی می‌شود، زیرا در هنگام شکست ترک‌هـایی در بـتن ایجـاد مـی‌شـود کـه افزایش میزان عرض ترک‌ها و درنتیجـه شکسـت کلـی نمونه را در پی خواهد داشت؛ اما وجود الیـاف فـولادی باعث ایجاد پل‌هایی در تـرک‌هـای ریـز مـی‌شـود و از توسعهٔ عرض ترک جلوگیری می‌کند.



(الف) سنگدانهٔ معمولی



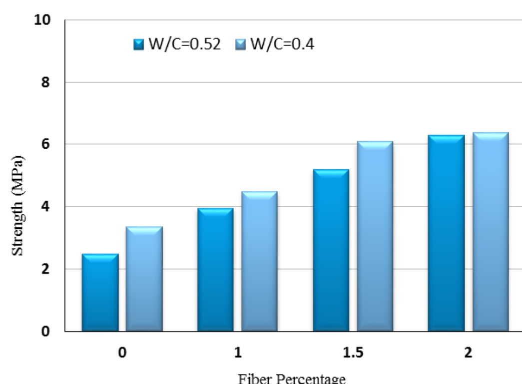
(ب) ۵۰٪ سنگدانهٔ سنگین



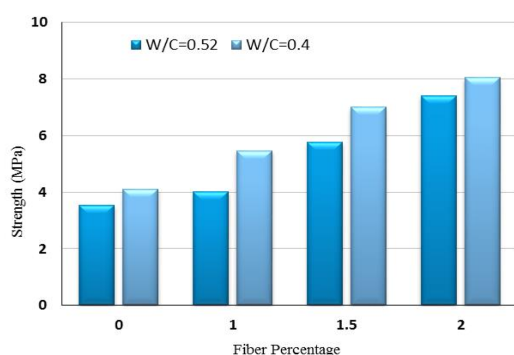
(ج) ۱۰۰٪ سنگدانهٔ سنگین

شکل ۹ مقاومت فشاری ۲۸روزهٔ نمونهٔ مکعبی با انواع سنگدانه براساس درصد الیاف

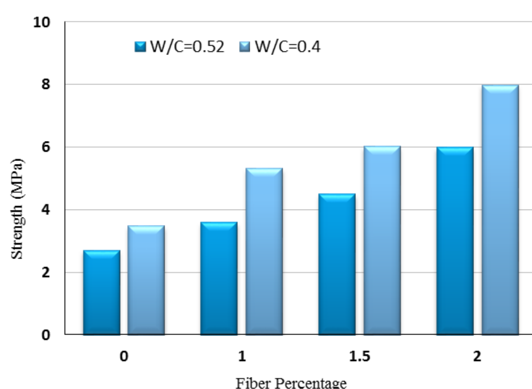
بیشترین درصد افزایش مقاومت کششی بتن در نتیجهٔ استفاده از الیاف فولادی مربوط به بتن N1F2 به‌میزان ۱۵۳/۰۱٪ نسبت‌به بتن بدون الیاف همان رده و کمترین درصد افزایش مقاومت مربوط به بتن NW1F1 و به‌میزان ۱۳/۵٦٪ مقاومت کششی بتن بدون الیاف همان رده است.



(الف) سنگدانهٔ معمولی



(ب) ۵۰٪ سنگدانهٔ سنگین



(ج) ۱۰۰٪ سنگدانهٔ سنگین

شکل ۱۰ مقاومت کششی ۲۸روزهٔ نمونهٔ استوانه‌ای با انواع سنگدانه براساس درصد الیاف

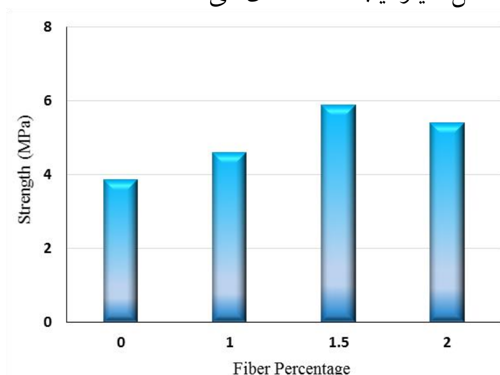
مقاومت برشی

درصد تغییرات مقاومت برشی بتن براساس درصد استفاده از الیاف در نمودارهای ستونی مقاومت برشی بتن شکل (۱۱) نشان داده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت برشی بتن با افزایش درصد الیاف در طرح‌های اختلاط مختلف تا درصد الیاف ۱/۵٪ افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. روند تغییرات مقاومت برشی بتن در همهٔ طرح‌های اختلاط ابتدا با افزایش درصد الیاف به‌میزان ۱٪ افزایش می‌یابد و شیب رشد آن با افزایش درصد الیاف به‌میزان ۱/۵٪ بیشتر می‌شود، اما با افزایش میزان الیاف از ۱/۵٪ مقاومت بتن با شیب ملایمی کاهش را نشان می‌دهد. نکتهٔ قابل توجه آن است که تأثیر میزان الیاف در همهٔ طرح‌های اختلاط مختلف ناشی از میزان سنگدانه‌های سنگین تقریباً یکسان است اما حداکثر افزایش مقاومت برشی بتن در بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌های سنگین و الیاف ۱/۵٪ اتفاق می‌افتد. قابل توجه است که حداکثر مقاومت برشی بتن در بتن‌های حاوی ۱/۵٪ الیاف فولادی و حداکثر مقاومت فشاری و کششی برزیلی در بتن‌های حاوی ۲٪ الیاف فولادی به‌دست می‌آید. بیشترین درصد افزایش مقاومت برشی بتن در نتیجهٔ استفاده از الیاف فولادی مربوط به بتن N1F1.5 به‌میزان ۵۲/۳۳٪ نسبت‌به بتن بدون الیاف همان رده و کمترین درصد افزایش مقاومت مربوط به بتن NW1F1 و به‌میزان ۱۶/۱۹٪ مقاومت برشی بتن بدون الیاف همان رده است.

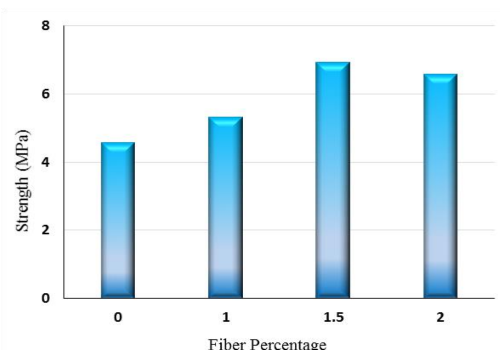
نتیجه‌گیری

باتوجه به مطالعات و بررسی‌های حاصل از انجام این پژوهش برروی استفادهٔ هم‌زمان از سنگدانه‌های سنگین مگنتیت و الیاف فولادی با انواع نسبت آب به سیمان، خواص فشاری و کششی و برشی و دیگر خواص به‌دست آمد که نتایج کلی ذیل را می‌توان بیان کرد:

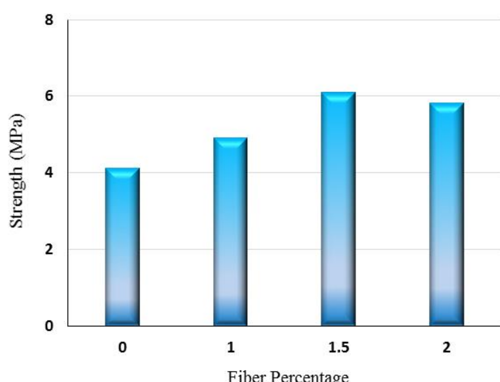
۱. در آزمایش مقاومت کششی برزیلی با افزایش درصد الیاف در نمونه‌ها، عمق و عرض ترک‌ها کمتر و در عوض تعداد آنها بیشتر می‌شود و در آزمایش مقاومت برشی با افزایش درصد الیاف، عمق و عرض ترک‌ها کمتر و تعداد آن بیشتر می‌شود و علی‌الخصوص در الیاف ۲٪ شکست نمونه دقیقاً از محل شیار ایجادشده اتفاق می‌افتد.



(الف) سنگدانهٔ معمولی



(ب) ۵۰٪ سنگدانهٔ سنگین



(ج) ۱۰۰٪ سنگدانهٔ سنگین

شکل ۱۱ مقاومت برشی ۲۸روزهٔ نمونه تیر با انواع سنگدانه براساس درصد الیاف

۲. اسلامپ نمونه‌ها با کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش درصد الیاف و سنگدانه‌های سنگین مگنتیت کاهش می‌یابد. بر این اساس به‌ازای اضافه نمودن یک درصد الیاف فولادی به نمونه‌ها و جایگزینی ۵۰ درصدی سنگدانه‌های سنگین به‌جای سنگدانه‌های معمولی، اسلامپ به‌طور تقریبی از ۱۰ تا ۲۰٪ کاهش دارد. هم‌چنین با کاهش ۳۰٪ نسبت آب به سیمان، اسلامپ نیز حدود ۳ تا ۱۸٪ کاهش خواهد یافت.

۳. وزن مخصوص سخت‌شدهٔ نمونه‌ها با افزایش درصد الیاف و افزایش میزان سنگدانه‌های سنگین افزایش می‌یابد اما افزایش یا کاهش وزن مخصوص با نسبت آب به سیمان قابل پیش بینی نیست. با جایگزینی کامل سنگدانه‌های سنگین به‌جای سنگدانه‌های معمولی وزن مخصوص به‌طور متوسط در نمونه‌های مختلف ۳۵٪ افزایش می‌یابد.

٤. با افزایش درصد الیاف فولادی، کاهش نسبت آب به سیمان و جایگزینی تا ۵۰٪ سنگدانه‌های سنگین مگنتیت به‌جای سنگدانه‌های معمولی، مقاومت فشاری بتن به‌طور متوسط از ۸ تا ٥٦٪ افزایش می‌یابد.

٥. با افزایش درصد الیاف و کاهش نسبت آب به سیمان، مقاومت کششی بتن افزایش می‌یابد که با اضافه نمودن ۲٪ الیاف فولادی به نمونه‌ها، مقاومت کششی برزیلی تا ۱۵۳٪ و با کاهش نسبت آب به سیمان ۰/۵۲ به ۰/٤ مقاومت کششی بتن حداکثر ٤۸٪ افزایش می‌یابد.

٦. مقاومت برشی بتن با افزایش درصد الیاف فولادی تا ۱/٥٪ و افزایش سنگدانه‌های سنگین تا ۵۰٪، حداکثر ۵۲٪ افزایش یافته و روند افزایش مقاومت با افزایش ۲ درصدی الیاف فولادی و ۱۰۰ درصدی سنگدانه‌های سنگین کاهش می‌یابد.

قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی شرکت گاز استان سمنان انجام شده‌است که از مسئولان آن شرکت قدردانی می‌گردد.

مراجع

1. ACI544.1 R96, "State of The Art Report on The Fiber Reinforced Concrete".
2. Bentur, A., Mindess, S., "Fibre Reinforced Cementitious Composites", *Elsevier applied science London and Newyork*, Pp. 624,(1991).
3. Colin, D. Johnston, "Fiber Reinforced Cements and Concretes", Advances in concrete technology Vol. 3, Gordon and Breach Science publishes, (2001).
4. کیوانی، عبداله،" بتن الیافی و کاربرد آن در سازه‌های بتنی"، کارگاه‌های تخصصی بتن، بتن‌های ویژه، مهرماه ٨٤،
5. Marar, Kh., Eren, Ö., Roughani, H., "The Influence of Amount and Aspect Ratio of Fibers on Shear Behaviour of Ssteel Fiber Reinforced Concrete", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 21, Issue 4, Pp. 1393–1399 (2017).
6. RILEM TC 162-TDF, "Test and Design Method for Steel Fibre Reinforced Concrete—σ−ε Design Method", Mater. Struct., 36, Pp. 560–567, (2003).
7. Doo-YeolYoo, Young-SooYoon, Nemkumar, B., "Flexural Response of Steel-fiber-reinforced Concrete Beams: Effects of Strength, Fiber Content, and Strain-rate", *Elsevier Cement and Concrete Composites*, Vol. 64, Pp. 84-92, (2015).

8. Murthy Dakshina, N., "Splitting Tensile Strength of High Volume Fly Ash Concretes with and without Steel Fibers in Different Grades", *International conference recent advance on concrete andconstruction technology,* SRMIST, Chennai, India, Pp. 23-33, Dec 7-9, (2005).
9. Permalatha, J., Govindraj, V., "Experimental sStudies on Fiber Reinforced Concrete", proceedimg of the INCONTEST, Coimbatore, Sep 10-12, Pp 462-468, (2003).
10. Raghuprasad, P., Ravindranatha, S., "Experimental Investigation on Flexural Strength of Slurry Infiltrated Fiber Concrete", *proceedimg of the INCONTEST, Coimbatore*, Sep 10-12, Pp. 403-408, (2003).
11. Wasim, A., Iqbal Khan, M., Mourad, Sh., "Evaluation of Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete with Different Strengths of Concrete", *Elsevier Construction and Building Materials*, Vol. 168, Pp. 556-569, (2018).
12. Afroughsabet, V., Ozbakkaloglu, T., "Mechanical and Durability Properties of High-strength Concrete Containing Steel and Polypropylene Fibers", *Elsevier Construction and Building Materials* Vol. 94, Pp. 73-82, (2015).
13. Sukontasukkul, P., "Tensile Behaviour of High Content Steel and Polypropylene Fiber Reinforced Mortar", *Thammasat International journal science on Tech*, Vol. 8, No.3, July-Sep, Pp. 50-56, (2003).
14. Özen., S., Şengül, C., Erenoğlu, T., "Properties of Heavyweight Concrete for Structural and Radiation Shielding Purposes", *Springer Arabian Journal for Science and Engineering,* Vol. 41, Issue 4, Pp. 1573–1584, (2016).
15. Ristinah, S., "Evaluation of the Characteristic of Heavyweight Concrete using Steel Slag Aggregates for Radiation Shielding", *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences. Brawijaya,* Indonesia, Vol. 1, No.11, Pp. 512-521. (2011).
16. Brand, A., Roesler J. "Steel Furnace Slag Aggregate Expansion and Hardened Concrete Properties", Elsevier Cement and Concrete Composites, Vol. 60, Pp. 1-9, (2015).
17. Akkurt, C., Basyigit, S., Kilincarslan, B., "Radiation Shielding of Concretes Containing Different Aggregates", *Elsevier, Cement and concrete research 28*, Vol. 28, No. 2, pp. 153 – 157, (2006).
18. Un, A., Demir, F., "Determination of Mass Attenuation Coefficients, Effective Atomic Numbers and Effective Electron Numbers for Heavy-weight and Normal-weight Concretes", *Elsevier Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 80, Pp. 73-77, (2013).
19. González-Ortega, M. A., Cavalaro, S. H. P., Aguado, A., "Influence of Barite Aggregate Friability on Mixing Process and Mechanical Properties of Concrete", *Elsevier Construction and Building Materials*, Vol. 74, Pp. 169-175, (2015)
20. Osma, Y., "Physical and Mechanical Characteristics of Heavyweight Concrete Produced Using

Barite", University of Süleyman Demirel, Master Thesis, (in Turkish) (2002).

21. Farooq, M. A., Sato, Y., Ayano, T. "Experimental and Numerical Investigation of Static and Fatigue Behavior of Mortar with Blast Furnace Slag Sand as Fine Aggregates in Air and Water", *Elsevier Construction and Building Materials*, Vol. 143, Pp. 429-443 (2017).
22. Horszczaruk, E., Sikora, P., Zaporowski, P. "Mechanical Properties of Shielding Concrete with Magnetite Aggregate Subjected to High Temperature", *Elsevier Procedia Engineering*, Vol. 108, Pp. 39-46 (2015).
23. Elkobbah, K., "Behavior of Heavy Weight Concrete under Impact Effect", *13th International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technolog*, Cairo, Egypt, (2009).
24. Singh, B. S., Ramana, K. V., "Mechanical Properties of Heavyweight cConcrete Using Heavyweight Coarse-aggregate as Hematite", *International journal of research in engineering and technology*. Vol. 3, Issue 09, (2014).
25. Binici, H., Aksogan, O., "Durability of Concrete Made with Natural Granular Granite, Silica Sand and Powders of Waste Marble and Basalt as Fine Aggregate", *Elsevier Journal of Building Engineering*, Vol. 19, Pp. 109-121 (2018).